



## SISTEMAS INNOVATIVOS PARA EL DIRECCIONAMIENTO DE LUZ NATURAL PELICULAS HOLOGRÁFICAS Y LUMIDUCTOS

Maria Victoria Fernández Xifra<sup>(1)</sup>, John Martín Evans<sup>(2)</sup>.  
Centro de Investigación Hábitat y Energía CIHE – SICyT.  
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires.  
Pabellón III, 4 to. Piso, Ciudad Universitaria. C.P: 1428, Cap. Fed., Buenos Aires.  
Fax: 54 011 4789- 6274. E-mail: vickyfx@yahoo.com / evans@fadu.uba.ar

**RESUMEN:** El trabajo muestra la evaluación de componentes para el direccionamiento de la luz usando películas holográficas y lumiductos en aplicaciones arquitectónicas, en especial para el aprovechamiento de luz cenital. Estos sistemas innovativos permiten el redireccionamiento de la luz natural, especialmente la luz directa del sol, logrando una captación selectiva de la iluminancia del cielo. Se propone realizar estudios del comportamiento de la luz tanto directa como difusa en dos muestras de películas holográficas y en lumiductos con distintas alternativas geométricas mediante ensayos con maquetas. Las técnicas aplicadas para realizar los estudios cuentan con diferentes etapas: de medición, evaluación, comparación, y verificación. Se desarrollan y evalúan diferentes alternativas y se logra obtener conclusiones acerca del comportamiento de la luz en los diferentes sistemas estudiados.

**Palabras clave:** Iluminación Natural, direccionamiento, películas holográficas, lumiductos.

### INTRODUCCIÓN:

Las películas holográficas o HOEs (Holographics Optical Elements) permiten un redireccionamiento de la luz natural. Se producen en films, que son laminados entre dos paneles de vidrio. Por el efecto físico de difracción diferentes formas de manipulación de la luz son posibles, comparables a espejos, prismas, lentes y otros elementos ópticos. Los vidrios laminados con hologramas para el direccionamiento de la luz permiten una gran variedad de aplicaciones en arquitectura, tanto para la utilización de energía solar, la optimización de confort en un ambiente, como también para el diseño con luz solar y la utilización de efectos de color.

Las aplicaciones en lumiductos como caso particular son potencialmente interesantes debido a las siguientes características:

- La superficie de captación es reducida si la comparamos con la de una ventana convencional, permitiendo la aplicación de películas holográficas aun con mayor costo por metro cuadrado, comparado con vidrios convencionales.
- Los lumiductos pueden reducir los efectos arco-iris típicos de los HOEs, con los múltiples reflejos que se producen en el interior de los mismos y que permiten la preconstitución parcial de luz blanca.
- Los hologramas permiten una desviación selectiva de la luz, aprovechando la luz de menor altura en invierno y una disminución de la luz intensa del verano.
- Este estudio presenta resultados de ensayos de películas holográficas utilizando muestras de dimensiones reducidas y modelos a escala en el Cielo Artificial y mediciones de sus características ópticas.

Los lumiductos son un sistema de iluminación con una tecnología innovativa e interesante, ya que ellos puede conducir la luz a través de largas distancias sin significativas pérdidas. El principio del funcionamiento de los lumiductos es coleccionar, direccionar y conducir la luz solar hacia los espacios interiores de un edificio.

El sistema consiste en tres componentes principales:

- 1- COLECTOR, que puede ser un concentrador, un helióstato, espejo o cúpula transparente.
- 2- DUCTO, sistema de transporte de la luz,
- 3- EMISOR, elemento de difusión o distribución de luz hacia los espacios interiores.

Se estudia como caso particular utilizar como elemento colector las películas holográficas en estudio con el fin de evaluar el comportamiento de la luz colectada por estas y conducida a través del lumiducto a un espacio estándar de medidas 3m x3m a escala en un modelo. Se estudia el comportamiento de luz directa.

<sup>1</sup> Becaria, Proyecto UBACyT de la programación científica 2001-2002

<sup>2</sup> Director del Proyecto. Código: A025.

## CONTROL Y DIRECCIONAMIENTO DE LA LUZ CON PELÍCULAS HOLOGRAFICAS

El principio de esta tecnología consiste en un aventanamiento que se cubre con una película transparente la cual contiene impreso un patrón invisible de difracción logrado por medio de técnicas holográficas. La ventana va a desviar la radiación solar directa y difusa sobre un ángulo bien definido (el cual se define por unas redes de difracción) hacia el interior del edificio. Redes similares pueden también utilizarse para reflejar la luz solar hacia otras direcciones.

Una de las principales ventajas de los HOEs es el hecho que contrariamente a los elementos ópticos convencionales su función es esencialmente independiente de su geometría. Otra ventaja es la posibilidad de solapar elementos, ya que varios hologramas pueden ser grabados en una misma capa. Hologramas con volumen, grabados en gelatinas dicromatadas pueden absorber cuatro imágenes diferentes con la información específica.

**Criterios para el uso de HOEs en Edificios: Aplicaciones:** Redirigir la luz difusa o solar que atraviesa una ventana hacia un gran área en el interior del local. Los HOEs se diseñan con el ángulo específico con respecto a la latitud del lugar en donde se ubican y según la estación del año.

- Cuando es necesario luz blanca: los hologramas de una única capa dispersan la longitud de onda de la luz entrante, por lo tanto no son apropiados salvo que este efecto sea el requerido.
- Cuando se pretende una alta transmitancia óptica para luz difusa: ya que hay regiones con condiciones de cielo nublado en la gran mayoría del tiempo y donde la cantidad de luz natural en el espacio no debería ser reducida
- Resistencia a los rayos UV.

**Producción de los Elementos en el Laboratorio de Holografía:** Se busca por medio de la holografía lograr que la luz al pasar por el elemento se comporte como lo haría pasando por un elemento óptico equivalente, con la ventaja de ser un elemento transparente, delgado aunque todavía costoso por ser una tecnología manual. Para gran variedad de aplicaciones, diferentes tipos de HOEs pueden ser desarrollados, en este caso en particular se conformaron un elemento de placa zonal cilíndrica para obtener la lente colimadora holográfica, y un placa zonal concéntrica para la lente direccionadora holográfica.

**-LENTE COLIMADORA HOLOGRÁFICA:** Hace que cada longitud de onda que traspasa el patrón sea direccionado en líneas paralelas.

**-LENTE DIRECCIONADORA HOLOGRÁFICA:** Produce el direccionamiento de cada longitud de onda que traspasa el patrón para que se unan en determinados puntos. Se busca que el holograma dirija la luz incidente a  $90^\circ$  con un ángulo de salida de  $45^\circ$ .

La luz, espectralmente descompuesta por el holograma, debe ser mezclada nuevamente al blanco para aplicaciones en edificios con el fin de evitar efectos arco-iris. La eficiencia de la difracción, definida como el ratio de radiación difractada del total de la radiación transmitida es en función de la longitud de onda.

La difracción se produce solo para un cierto ángulo de incidencia. Para otros ángulos de incidencia los hologramas no trabajan, solo son claros. Los hologramas son altamente transparentes para todos los ángulos de incidencia, la absorción del film es menor al 10 %.

### **Mediciones con luz difusa:**

Los ensayos de maquetas permiten medir y visualizar la cantidad y calidad de luz en interiores.

Se armaron dos modelos de un local básico de medidas 3 x 3 m y 3m de altura, uno con aberturas vertical y horizontal de 1m x 1m y el otro para abertura con inclinación  $45^\circ$  con el mismo tamaño. (Ver Figura 1).

Se realizaron mediciones en el cielo artificial el cual reproduce la distribución lumínica del cielo nublado, sin variaciones temporales como el cielo real. Se tomaron mediciones con y sin los HOEs para poder comparar resultados. Se evaluaron todas las posiciones posibles de ambas caras de los dos prototipos a analizar.

Se tomaron mediciones en una grilla de 12 puntos. Con los datos obtenidos se armaron gráficos que permitieron comparar la diferencia en cuanto a los niveles de iluminación con y sin la aplicación de HOEs no solo en su distribución sino también en la calidad y cantidad de luz que entra en el modelo del local.

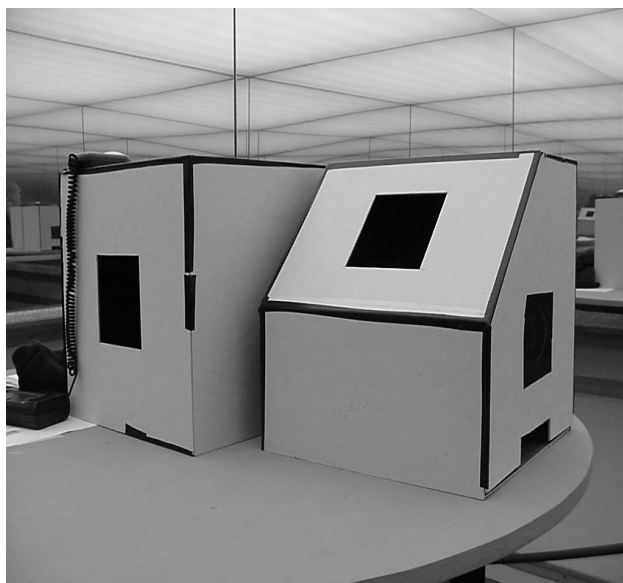


Figura 1: Fotografía de los modelos utilizados para realizar las mediciones.

### Conclusiones Parciales. Luz Difusa:

El desempeño de los HOEs testeados para luz difusa en el CIELO ARTIFICIAL fue muy pobre. No se visualizaron efectos significativos ya que la onda de luz al ser luz difusa proviene de varias direcciones. Si hubo algún efecto de re-direccionamiento específico fue tan leve que no logro ser detectado.

### Mediciones con luz directa:

Con la aplicación de luz directa de una lámpara de quartz de 500 watts distanciada a 1 metro del HOE y la utilización de luxómetros se realizaron mediciones en 40 puntos en un arco de medición de 180 grados tomados cada 5 grados ubicados a una distancia de 0,50 m del HOE sobre papel negro. Las mediciones corresponden a cada uno de los HOEs en las cuatro posiciones posibles de ambas caras. Se realiza un registro con maquina digital del comportamiento de cada uno de los HOEs ante la aplicación de luz directa. (Ver Figuras 2 y 3)

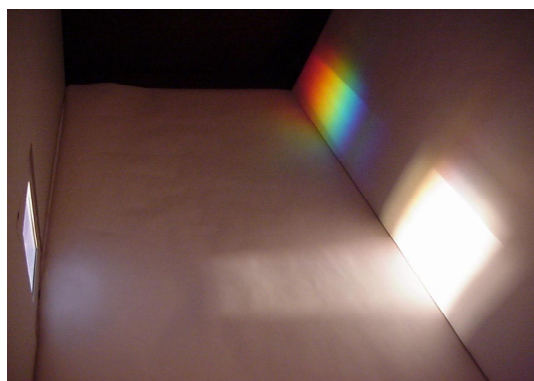
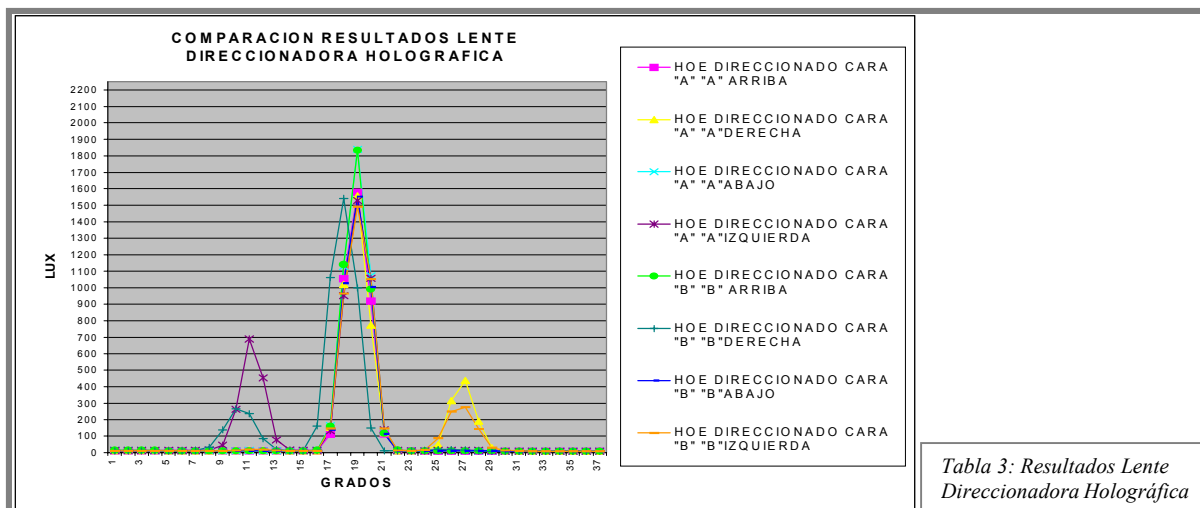
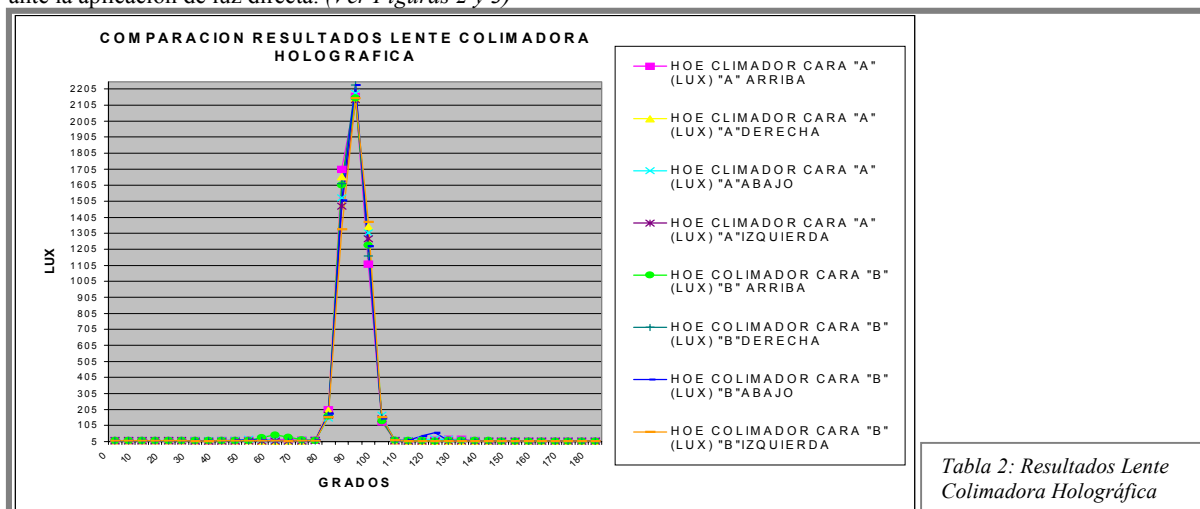


Figura 2 y 3: Fotografías HOEs con Luz Directa

### Conclusiones Parciales. Luz Directa:

En la Tabla 2 se puede observar que los resultados de las mediciones en ambas caras y en las cuatro posiciones son muy parejos, no hay variaciones considerables. La curva pronunciada que se observa en el sector medio del gráfico corresponde a la luz directa que pasa a través del HOE. En este tipo de película no se produce una desviación de la luz con intensidad.

En la Tabla 3 claramente puede observarse que se produce con este tipo de película una desviación de la luz entrante. Es fácilmente reconocible el efecto al observar un aumento de los valores de las mediciones en ciertos ángulos. Este tipo de película holográfica produce un efecto intenso ya que los niveles de iluminación en donde se produce el aumento alcanzan a duplicar y hasta triplicar el nivel de luz alcanzado en los sectores donde no tienen influencia del HOE. Puede distinguirse también que difiere el efecto logrado al girar la película y al cambiar la cara utilizada.

Cuando se testeó con luz directa se comprobó una potencial aplicación de la Lente Direccional Holográfica en lumiductos ya que los niveles de iluminación de la luz re-direccionada alcanza valores significativos, aun produciendo efecto arco iris, no así los valores de la Lente Colimadora Holográfica. Esta aplicación estaría basada en captar además de la luz que llegaría al lumiducto, luz de otros ángulos, y por medio de múltiples reflejos recomponer el efecto arco-iris logrando obtener luz blanca de la luz direccionada por el HOE.

Por otra parte, este tipo de tecnología tiene un potencial para aplicaciones en el diseño de elementos de re-direccionamiento de la luz, sin alterar la distribución de la superficie vidriada en las fachadas de edificios, aunque en ciertos ángulos de visión se crean efectos arco-iris.

### **DIRECCIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE LA LUZ UTILIZANDO LUMIDUCTOS**

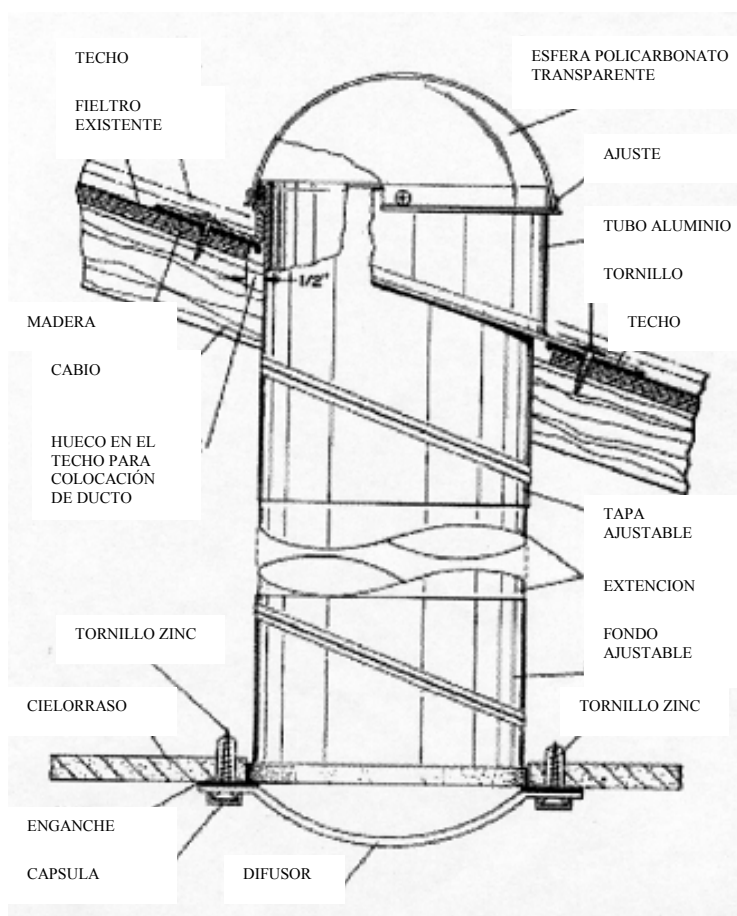
La principal función de los sistemas de transporte de la luz es transferir el recurso de luz exterior hacia un emisor interno. El sistema de transporte puede ser dividido en diferentes tipos, la forma mas básica es un simple cilindro vacío a lo largo del cual un rayo de luz colimado puede viajar. Los ductos espejados, por ejemplo, son un sistema donde la luz es guiada utilizando la reflectancia de la superficie del espejo para reflejar y difractar la luz hacia una distancia requerida, de la misma forma la superficie puede ser otro material reflectivo. Como ya hemos dicho antes, este sistema consiste en tres componentes principales:

- 1-COLECTOR, que puede ser un concentrador, un heliostato, espejo o cúpula transparente.
- 2-DUCTO, sistema de transporte de la luz,
- 3-EMISOR, elemento de difusión o distribución de luz hacia los espacios interiores

**El colector** puede ser un espejo, generalmente cóncavo, o un lente Fresnel, un sistema rotativo de doble placa prismática, un heliostato o simplemente una cúpula transparente.

**El ducto** puede ser un tubo metálico con una superficie interna pulida y altamente reflectiva o del tipo. Existen varios tipos de ductos: un tubo metálico reflectivo, fibra óptica, un tubo de acrílico sólido, y un prisma para guiar la luz. La eficiencia del sistema depende principalmente del conducto, su calidad y su longitud. La concentración y colimación de la luz, así como la limpieza y el mantenimiento del ducto son muy importantes. La eficiencia de un buen sistema puede llegar a exceder el 25 %, medido desde la luz incidente el colector primario hasta el emisor de luz en la habitación.

**El Emisor** distribuye la luz que sale del sistema de transporte hacia el espacio a iluminar. Se hace menos evidente que este recurso natural halla sido conducido por una cierta distancia, entonces es común que los ocupantes del edificio demanden la misma calidad de iluminación que se obtiene de una luminaria corriente. Igualmente el emisor es similar a una luminaria para iluminación eléctrica y por elección puede ser directo, semi-directo, difusor, semi-indirecto o totalmente indirecto.



*Figura 4: Esquema de elementos del Sola-Tube*

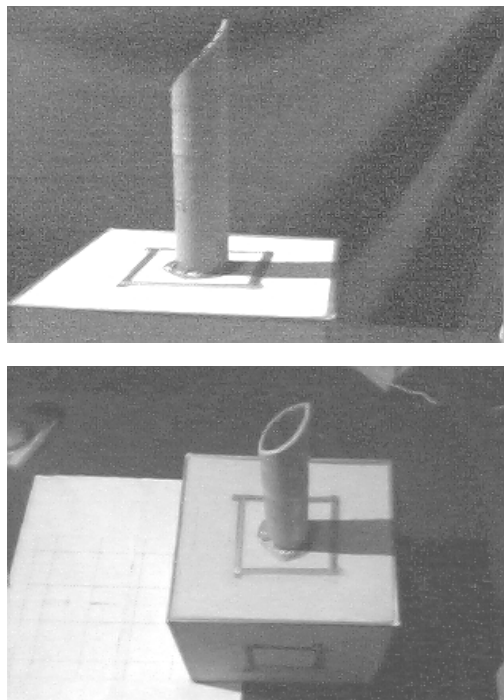
Un problema con el sistema de lumiducto es que es la disminución de luz transmitida cuando no hay luz solar directa, especialmente con sistemas con espejos o heliostatos. Por lo tanto se requiere de algún tipo de lámpara artificial. Lo ideal sería utilizar una lámpara de descarga de alta intensidad por su temperatura de color que puede ser comparada a la luz natural.

**Ejemplo de Sistema Comercializado en la Actualidad: “SOLA-TUBE”. Lumiducto simple de un punto:** Es una versión sencilla de LUMIDUCTO comercializado en Estados Unidos y Australia. (Ver Figura 4). Es bastante popular para el uso domestico, especialmente para baños internos, corredores, o pasillos. Tiene una esfera (de aproximadamente 250mm) en el techo con un adaptador de aluminio pulido dentro, el cual refleja los rayos de sol que provienen de bajos ángulos hacia el tubo.

El sistema de transporte de un lumiducto puede ser dividido en diferentes tipos, la forma mas básica es un simple cilindro vacío a lo largo del cual un rayo de luz puede viajar. Puede ser un tubo metálico con una superficie interna pulida y altamente reflectiva o del tipo. Este tipo de sistema es el elegido para realizar los ensayos.

Se armaron lumiductos a escala 1:10 de distintos largos y diámetros. Las medidas elegidas para realizar las mediciones fueron: 50 y 70 cm de diámetro para cada ducto de 3 y 5 metros de largo en escala y con diferente terminación interior y superior. La terminación para cada ejemplo en el sector superior del ducto era u horizontal o con una inclinación a 45 grados con el fin de estudiar y comparar el comportamiento de la luz al entrar en los diferentes cilindros. Los ductos fueron revestidos internamente con papeles aluminizados de los cuales ya se conoce la reflectancia espectral.

*Figura 5 Y 6: Fotografía de modelo de Lumiducto de 70 cm e inclinación superior a 45 grados.*



Se utilizo como objeto base para realizar las mediciones un modelo a escala 1:10 de un local de medidas 3m x 3m x 3m de altura en el cual se colocaran los diferentes ductos a escala en una abertura superior de 50 y 70 cm de diámetro respectivamente. Para obtener un resultado global de la situación luminica dentro del modelo se utilizó una grilla de 16 puntos distanciados entre si aproximadamente 60 cm en escala. Se realizaron mediciones con diferentes terminaciones interiores del local con el fin de comparar los resultados según las reflectancias interiores. Se utilizo un interior gris oscuro mate para evitar aportes adicionales de iluminación reflejada por las superficies interiores. Luego se realizaron las mismas mediciones pero con un interior blanco para que la luz entrante sea distribuida por los reflejos internos a todo el local. Ya que los resultados de este método de evaluación dependen de la construcción del modelo se tuvo especial cuidado en evitar filtraciones de luz al local utilizando cinta negra en todas las uniones. Cuando los modelos están correctamente contruidos los resultados obtenidos de los niveles de iluminación y la distribución de la luz serán confiables.

Inicialmente se realizan las mediciones de la situación del local solo con la abertura superior de 50 y 70 cm de diámetro pero sin la incorporación del ducto con el fin de poder realizar comparaciones entre diferentes situaciones del local según el sistema de iluminación adoptado. Este funcionaria como un simple aventanamiento horizontal.

#### **INCORPORACIÓN DE LOS ELEMENTOS HOLOGRÁFICOS EN EL SECTOR SUPERIOR DEL LUMIDUCTO:**

Se realizaron mediciones en el mismo modelo del local utilizado en el Cielo Artificial, se seleccionó la utilización de los lumiductos que internamente se revistieron con el papel de aluminio de Kicsa, ya que se comprobó que este permite obtener valores mas altos de iluminación ya que su reflectancia espectral es mayor. Luego de comprobar todas las posiciones posibles del sol según los diferentes ángulos de incidencia de la luz que plantea el Heliódón ya sea por la posición del sol en las distintas épocas del año como también por la situación horaria, se llegó a la conclusión de utilizar la situación de EQUINOCCIO a las 12:00 para realizar las mediciones. (Ver Figura 8). Las razones por las cuales se llegó a esta conclusión es haber comprobado que en los distintos horarios del día en una misma época del año solo a las 12:00 hs el sol esta situado con una altura suficiente como para permitir el ingreso de la luz al ducto.

También se verifico el funcionamiento del ducto en las diferentes épocas del año. En verano la luz que pasa a través del lumiducto es muy puntual, como si no se hubieran producido reflejos en el interior del mismo, lo que provoca una situación demasiado despareja en el interior del local en cuanto a la distribución de la luz, ya que en el sector central la iluminación es muy intensa y hacia las esquinas casi no llega luz. Se intento también la utilización del elemento holográfico y se comprobó

que este tampoco funciona con los ángulos de incidencia estudiados. El ángulo en que se encuentra el sol en invierno es muy bajo y el ducto no llega a permitir el ingreso de la luz en el mismo. Las verificaciones planteadas se realizaron tanto para el ducto de terminación superior horizontal como también de inclinación a 45 grados.

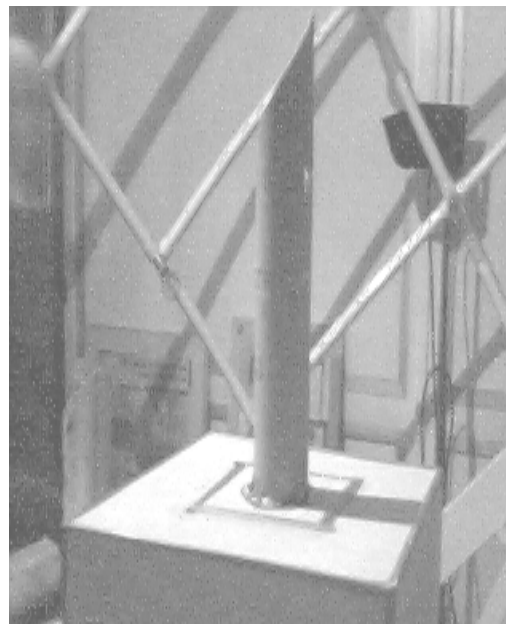
Para realizar las mediciones se utilizó la LENTE DIRECCIONADORA HOLOGRÁFICA ya que la colimadora no funciona para direccionar la luz que llega al elemento. La lente permite captar la luz y direccionarla al interior del local. Las mediciones se realizaron en una grilla de 49 puntos, lo que permitió captar hasta las menores variaciones del nivel de iluminación producido también por los diferentes colores que producía el elemento holográfico.

### CONCLUSIONES.

Los lumiductos estudiados no lograron reducir los efectos arco iris típicos de los HOEs, se comprobó que con los múltiples reflejos que se producen en el interior de los mismos no se logró la reconstitución parcial de luz blanca. La utilización de papeles de aluminio en lugar de aluminio de alta reflectancia o materiales mas reflectivos puede también ser una de las causas por las que no se logra dicho efecto.

Si bien el efecto arco iris no fue evitado, la utilización de hologramas en el orificio superior del lumiducto permitió un aumento realmente importante de los niveles de iluminación dentro del local, esto se explica porque el elemento holográfico el cual fue registrado para un ángulo de incidencia de la luz de 45 grados funciona correctamente cuando la luz proviene de dicha inclinación.

Se puede observar también que los niveles de iluminación del lumiducto de menor longitud son mayores ya que no se produce tanta pérdida por reflejos en el interior del ducto.



*Figura 8: Lumiducto de 3m de largo y terminación a 45 grados . Fotografía en el Heliodón.*

### BIBLIOGRAFÍA

- Evans . J. M et al (1998) Iluminación en Maquetas y espacios con Iluminación Natural. AERMA. Vol.2,1998, N°2
- PJ Littlefair et al (1996). Designing with innovative Daylighting. BRE. London.
- Andras Majoros (1998). Daylighting, PLEA Notes, Note 4 Passive and low energy Architecture International. Australia.
- Baker, N., Fanchiotti, A., y Steemers, K., Daylight in Architecture, James & James, London, 1993. Oxford
- Evans, J. M., y de Schiller, S., Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar, EUDEBA Ediciones Previas, Buenos Aires, 1994.
- Fontoyntont, M., Daylighting Performance of Buildings, James & James, London, 1999.
- Tregenza, P. & Loe, D., The Design of Lighting, E & FN Spon, London, 1998.
- Leony Sze-Hui Au, Honours Thesis, Chapter Three, Innovativa Daylighting System, Australia, 1999

### ABSTRACT

This paper presents the evaluation of different components used to redirect light with Holographics Optical Elements and solar tubes for architectural applications. The techniques were applied in different stages: evaluation, , comparison, and verification. Different lighting design alternatives were developed and evaluated in order to optimise this natural resource, using directional systems.

**Keywords:** Daylighting, directional systems, Holographics Optical Emements, Solar tubes.